氮肥后移对花铃期水分亏缺棉花产量的补偿效应研究

代健敏[1]， 何庆雨[2]， 谢 玲[2]， 窦巧巧[2]， 张巨松[1]

（1. 新疆农业大学农学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 教育部棉花工程研究中心，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：花铃期是棉花产量形成最关键的时期，为探究氮肥后移对花铃期水分亏缺棉花产量的补偿效应，以新路早45号为供试材料，采用裂区试验设计，主区设定2个花铃期滴灌量：常规灌溉量2410 $m^3 \cdot hm^{-2}$（W1）为对照、亏缺灌溉量1668 $m^3 \cdot hm^{-2}$（W2）；副区为3种花铃期施肥比例：N1（花期肥:铃期肥为3∶3）、N2（花期肥:铃期肥为2∶4）、N3（花期肥:铃期肥为4∶2）进行探究。结果表明：（1）相同氮肥条件下，水分亏缺较正常灌溉处理的叶面积指数（LAI）、净光合速率（*Pn*）显著降低；（2）根据干物质积累Logistic模型，干物质最大积累速率（*V*m）出现时间、干物质进入快速积累期时间拐点（t_1）均有所提前、干物质快速积累持续时间（Δ*t*）有所延长，生殖器官干物质积累量及占比显著降低；（3）水分亏缺处理的单株铃数、单铃重较正常灌溉平均降低了11.7%，45.6%，籽棉产量平均降低了17.3%，耗水量、氮肥偏生产力平均降低了35.49%、15.97%，水分利用效率平均增加了16.77%。与正常灌溉相比，花铃期水分亏缺条件下，氮肥后移（N2）较N1、N3处理的棉花LAI、*Pn*都有所增加，且表现为：N2>N1>N3；（4）氮肥后移（N2）处理下的干物质累积量、Δ*t*、*V*m表现最优，干物质快速积累期特征值（*GT*）最为协调，棉花营养生长向生殖生长的转移率最高，为68.25%；（5）与N1和N3处理相比，氮肥后移（N2）处理的棉花单株铃数、单铃重分别增加了10.40%、16.02%和8.41%、11.61%，籽棉产量分别增加了7.32%，13.88%，耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力均表现为：N2 > N1> N3。综上所述，氮肥后移通过提高棉花花期LAI及*Pn*、减缓盛铃后期的LAI和*Pn*的下降幅度，增加地上部分干物质积累量并提高了生殖器官所占比例，调控产量及其构成要素，以减轻水分胁迫对产量的影响。

关键词：棉花；氮肥后移；花铃期；水分亏缺；氮肥运筹

在干旱、半干旱地区限制作物生长发育和产量的重要因素是水分和养分[1-2]，棉花花铃期对水肥需求最为敏感，花铃期季节性缺水会严重影响其生长发育[3-4]。干旱或供水不足将对作物养分吸收产生不利影响[5]。适量的氮肥施用能够调节作物地上部分的生长、增强作物的抗旱性[6-9]。氮肥过量，将导致氮肥利用率低下，土壤生产力下降、生态环境恶化以及增加生产成本[10]，因此，通过氮肥运筹应对花铃期水分供应不足具有重要意义。

亏缺灌溉显著影响棉花生长发育，水分过度亏缺导致棉花产量下降，造成棉花的早衰[11]、降低棉花的株高[12]、叶面积指数、单铃重及结铃数[13]，降低生殖生长的分配比例和干物质积累量[14]。研究发现，合理的氮肥施用策略能够改善棉花的生育进程[7]、提高叶面积指数及净光合速率[15]，提高快速累积期的平均积累速率以及快速累积期积累的干物质量，最终有利于获得较高的棉花产量[16]。在干旱或水分亏缺条件下适量施用氮肥可减轻干旱胁迫对作物生长发育的影响，促进产量提高[17-18]。前人在棉花[7]、小麦[19]、水稻[20]、花生[1]、荞麦[21]等作物研究中发现，在水分不足时，增加适量氮肥的施用有利于增强作物的抗旱性。

水分调控和氮素管理与水分胁迫的时期、程度和施氮量有关[22-23]，前人在不同程度的干旱胁迫、水分亏缺等条件下的氮肥施用量[7,24]、氮肥的施用运筹对棉花生长及氮素利用有不同层次的研究[16,25]，有关棉花花铃期水分供应不足时如何进行氮肥运筹的报道尚缺乏。因此，在此施氮量下，本试验通过

收稿日期：2021-11-16； **修订日期：**2022-02-12

基金项目：新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A01002-4)

作者简介：代健敏（1997-），女，硕士研究生，主要研究方向为棉花高产栽培. E-mail: wttdjm@163.com

通讯作者：张巨松. E-mail: xjndzjs@163.com

模拟棉花花铃期水分亏缺，研究氮肥后移对花铃期水分亏缺棉花生长发育及籽棉产量的影响，为北疆棉花机采棉栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

于2020年4—10月在新疆沙湾县四道河子镇渠边村(44°29′N、85°57′E，海拔352 m)开展试验。该地区属温带大陆性干旱气候，无霜期170~190 d，年均降水量140~200 mm，年蒸发量1500~2000 mm，年日照2800~2870 h，年平均气温6.9 ℃。试验田前茬为棉花，土壤质地是黏质壤土，土壤理化性质见表1。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 试验设计 试验采用裂区试验设计，供试品种为'新陆早45号'。主区设置为2个花铃期灌水量：2410 $m^3 \cdot hm^{-2}$(常规灌水量W1)、1668 $m^3 \cdot hm^{-2}$(亏缺灌水量W2)，全生育期内总灌水量分别为3750 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W1)、2950 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W2)；副区为3种花铃期施肥比例，分别为常规施氮(N1，花期肥：铃期肥为3:3)、氮肥后移(N2，花期肥：铃期肥为2:4)、氮肥前移(N3，花期肥：铃期肥为4:2)。各处理总施氮量为纯氮320 $kg \cdot hm^{-2}$。采用1膜3管6行棉花种植模式，行距配置66+10 cm，株距10 cm，理论株数2.25×10^5株$\cdot hm^{-2}$，共6个处理，重复3次，18个小区，幅宽2.3 m；小区长10 m，宽6.9 m，小区面积(3膜)：69 m^2，总占地面积共1242 m^2。在棉花整个生育期，一共滴灌8次，自棉花现蕾，每10 d滴灌1次水，花铃期滴灌5次(表2)，基肥与蕾期各施入全生育期20%的纯氮，花铃期追施60%纯氮。水表控制滴灌量，称取所需氮肥，放入各处理的施氮罐中，随水滴施，其他管理同大田管理一致。

1.2.2 农艺性状与生育进程的测定 在棉花吐絮期，在每个小区的中膜选取长势均匀的棉株，中行5株、边行5株，使用卷尺测定棉花的株高，游标卡尺测定茎粗，果枝数、有效果枝数直接数取；调查并记录各小区50%棉花达到初花、盛花、盛铃、吐絮的日期。

1.2.3 叶面积指数(LAI)、净光合速率(Pn)的测定 在棉花的盛蕾期、盛花期、盛铃期、吐絮期使用CI-110植物冠层分析仪于19:00—21:00无强烈直射光时，将鱼眼探测器放置于小区棉株主茎处采集图像。测定方法：测定垂直地面20 cm处的膜间和行间平均值作为1次测量值，各样点重复5次，图像采用Plant Canopy Analysis System专用软件分析，测定棉花的叶面积指数(LAI)。利用便携式光合仪器ciras-2，在晴朗无云的天气条件下，于11:30—1:30测定主茎功能叶的净光合速率(Pn)。打顶前取主茎倒四叶，打顶后取主茎倒三叶。在测量过程中，避开主叶脉，每个处理测量3片叶子，取平均值。

表1 土壤理化性质

Tab. 1 Soil basic physical and chemical properties

土层/cm	pH	全氮/($g \cdot kg^{-1}$)	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	水解性氮/($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷/($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/($mg \cdot kg^{-1}$)
0~20	8.88	0.72	13.7	58.4	13.5	368
20~40	8.86	0.67	13.6	45.2	13.8	341
40~60	8.84	0.33	5.35	46.7	4.4	206

表2 棉花各生育时期水氮配比

Tab. 2 Drip irrigation scheme and fertilization scheme

处理	播种	蕾期/月-日		花期/月-日		铃期/月-日			吐絮期/月-日	总量
		06-01	06-10	06-20	07-01	07-11	07-22	08-02	08-12	
灌水量/($m^3 \cdot hm^{-2}$)										
W1	-	450	450	500	550	530	500	470	300	3750
W2	-	450	450	380	390	350	340	290	300	2950
施氮量/%										
N1	20	5	10	8	22	20	7	3	5	100
N2	20	5	10	0	20	30	8	2	5	100
N3	20	5	10	10	30	15	5	0	5	100

1.2.4 地上部分干物质积累与分配 在棉花初花期、盛花期、盛铃期和吐絮期，每个小区选取具有代表性的棉株2株，每个处理共6株，以茎、叶作为营养器官，蕾花铃作为生殖器官分开处理，在105 ℃杀青30 min后，在80 ℃恒温烘干至恒重，称量干物质量，并计算出营养器官与生殖器官的分配量。

1.2.5 产量及产量构成因素 在棉花吐絮期，在每个小区中膜量取6.67 m^2，数取范围内的株数和铃数为实际收获株数及总铃数，在每个小区摘取棉株下部30朵吐絮棉铃（1~3果枝），中部40朵吐絮棉铃（4~6果枝），上部30朵吐絮棉铃（7果枝以上），晾干扎花，计算棉花单铃重和衣分。依据棉花产量构成因素，计算各小区籽棉产量。

1.2.6 耗水量 本研究中采用水量平衡法测定棉田耗水量（Evapotranspiration，*ET*），耗水量的计算公式为：

$$ET = 10\sum_{i=1}^{n} \gamma i Hi\left(\theta i_1 - \theta i_2\right) + I + P + K \qquad (1)$$

式中：*ET* 为阶段耗水量，mm；*i* 为土壤层次号数；*n* 为土壤层次总数，本试验为3；γi 为第*i*层土壤干容重，g·cm^{-3}，本试验为1.448 g·cm^{-3}；*Hi* 为第 *i* 层土壤厚度，本试验为0.2 m；θi_1 为第 *i* 层土壤初时段的含水率，以占干土重的百分数计(%)；θi_2 为第 *i* 层土壤末时段的含水率，以占干土重的百分数计(%)；*I* 为时段内的灌水量，mm；*P* 为时段内的有效降水量，mm；*K* 为时段内的地下水补给量，mm；本试验地下水埋深在5 m以下，无地下水补给。

1.2.7 水分利用效率 水分利用效率计算公式为：

$$WUE = Y/ET \qquad (2)$$

式中：*WUE* 为水分利用率（kg·hm^{-2}）；*Y* 为籽棉产量（kg·hm^{-2}）；*ET* 为耗水量。

1.2.8 氮肥偏生产力 肥料偏生产力计算公式为：

$$PFP = Y/F_N \qquad (3)$$

式中：*PFP* 为氮肥偏生产率（kg·kg^{-1}）；*Y* 为籽棉产量（kg·hm^{-2}）；F_N 为棉花全生育期投入的纯氮量（320 kg·hm^{-2}）。

1.2.9 数据分析 试验数据使用SPSS 23.0进行方差分析，使用Duncan法进行处理间多重比较（$P<0.05$），利用GraphPad和Excel 2019整理数据并绘图。

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花生育进程的影响

如表3、表4所示，自盛花期各处理间的棉花生育进程开始出现差异。在相同氮肥处理下，亏缺灌溉生育期较常规灌溉提前了4~10 d；在相同灌溉量下，N2处理使棉花生育期明显滞后，常规灌溉下N2

表3 不同处理下对棉花生育进程的影响

Tab. 3 Effects of different treatments on cotton growth process

滴灌量	氮肥处理	初花/月-日	盛花/月-日	盛铃/月-日	吐絮/月-日
W1	N1	06-20	07-02	07-18	08-24
	N2	06-20	07-03	07-20	08-28
	N3	06-20	07-08	07-22	08-22
W2	N1	06-20	07-07	07-25	08-19
	N2	06-20	07-02	07-23	08-22
	N3	06-20	07-04	07-21	08-13

表4 不同处理对棉花生育阶段的影响

Tab. 4 Effect of different treatments on the growth stage of cotton

滴灌量	氮肥处理	初花-盛花/d	盛花-盛铃/d	盛铃到吐絮/d	生育期/d
W1	N1	12	16	36	134
	N2	13	17	38	138
	N3	18	14	30	132
W2	N1	17	19	24	130
	N2	12	21	30	132
	N3	14	17	23	124

处理最为明显；从整个生育时期来看，常规灌溉量下N1处理与亏缺灌溉下N2处理最为合理，仅相差2 d；常规灌溉下N3处理、亏缺灌溉下N1、N3处理造成棉花早衰；其中，亏缺灌溉下的N3处理表现出严重早衰，生育期缩短2~10 d。

2.2 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花农艺性状的影响

如表5所示，相同氮肥处理下，亏缺灌溉较常规灌溉处理的棉花株高、茎粗、有效果枝、真叶数有所下降，主茎倒四叶宽有所提高。在相同灌水处理，棉花的株高、茎粗、主茎倒四叶宽随着氮肥后移而增大，表现为：N2>N1>N3，真叶数无显著性差异；在常规灌溉下的株高、茎粗、主茎倒四宽均无显著差异；N1较N2、N3处理有效果枝数显著增加，增加了18.29%、23.3%；亏缺灌溉下，N2较N1、N3处理的株高、茎粗增加、主茎倒四叶宽无显著差异，有效果枝数增加了4.63%、13.04%。

2.3 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花LAI的影响

从整个生育时期来看(图1)，棉花叶面积指数先升后降，在盛铃期达到最大值。在不同生育期，亏缺灌溉条件下氮肥处理的棉花叶面积指数较常规灌溉条件下显著降低，开花初期后显著降低，盛花期、盛铃期、盛铃后期、吐絮期平均下降了21.4%、29%、22.4%、9.7%。在盛铃期棉花各处理叶面积指数差异性显著，在常规灌溉下N1较N2、N3处理分别增加了31.29%、52.36%；亏缺灌溉下N2较N1、N3处理分别增加了17.79%、32.38%。

2.4 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花净光合速率(*Pn*)的影响

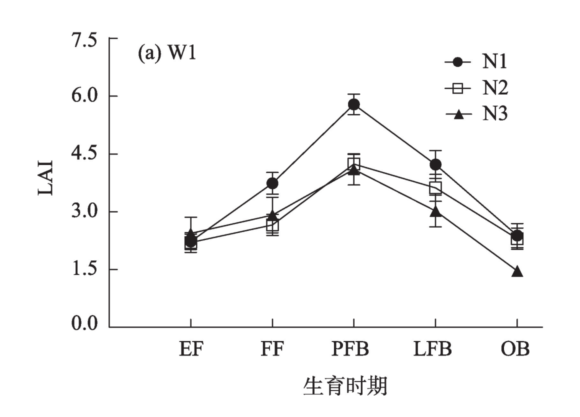
由图2可知，各处理的棉花*Pn*随着生育期的推进先增后减，2个灌溉量自初花期后各氮肥处理的棉花*Pn*存在显著性差异。亏缺灌溉较常规灌溉处理棉花*Pn*在盛花期、盛铃期、盛铃后期、吐絮期均有

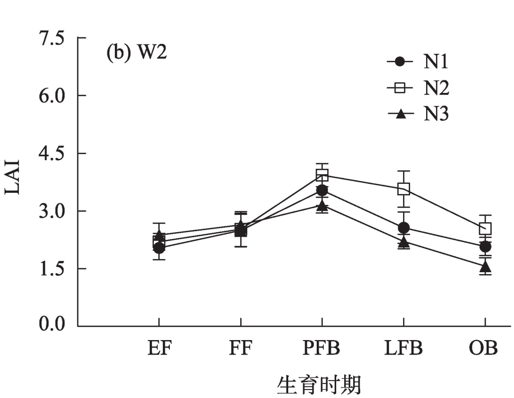
表5 各处理对棉花主要农艺性状的影响

Tab. 5 Effects of various treatments on main agronomic traits of cotton

滴灌量	氮肥处理	株高/cm	茎粗/mm	倒四宽/cm	真叶数	有效果枝
W1	N1	77.66a	9.75b	12.53b	14.07a	6.66a
	N2	85a	10.43a	14.37a	13.95a	5.63b
	N3	72b	9.1b	13.60ab	14.27a	5.4b
W2	N1	65.66c	7.74b	14.40a	13.67a	4.97c
	N2	71.66c	8.81ab	14.50a	13.89a	5.2b
	N3	60.33c	7.04c	13.23ab	13.53a	4.6c

注：同列小写字母表示不同氮肥处理间在0.05水平上的差异显著性。下同。





注：W1：花铃期常规灌水量2410 $m^3 \cdot hm^{-2}$；W2：花铃期亏缺灌水量1668 $m^3 \cdot hm^{-2}$；N1：花期肥：铃期肥为3:3；N2：花期肥：铃期肥为2:4；N3：花期肥：铃期肥为4:2；EF：初花期；FF：盛花期；PFB：盛铃期；LFB：盛铃后期；OB：吐絮期。下同。

图1 不同处理对棉花花铃期LAI的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on LAI of cotton at flowering and boll stage

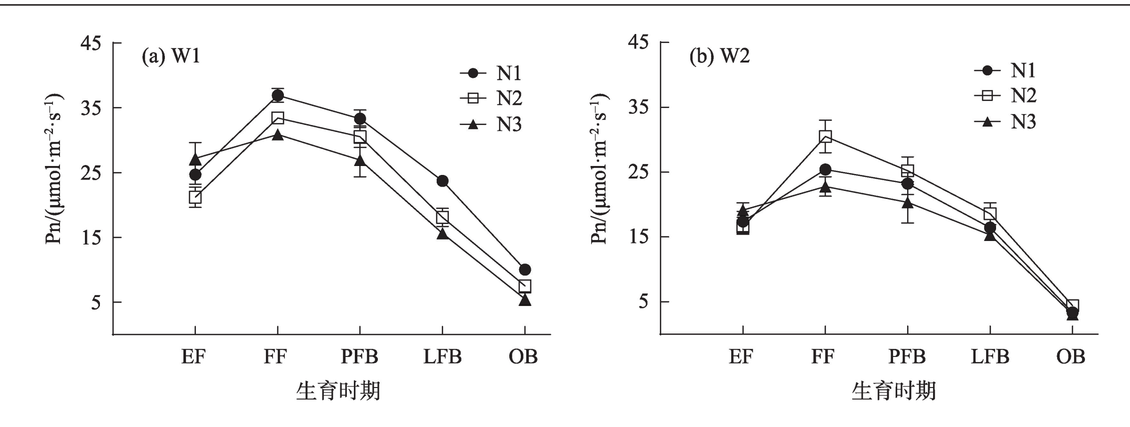


图2 各处理对各时期棉花净光合速率(*Pn*)的影响

Fig. 2 Effect of each treatment on the net photosynthetic rate (*Pn*) of cotton in each period

所下降,盛铃后期至吐絮期,*Pn*快速下降。随着生育期的推进,除初花期外,常规灌溉各氮肥处理呈现为:N1>N2>N3,亏缺灌溉为:N2>N1>N3。常规灌溉N2、N3较N1处理棉花*Pn*在盛花期分别减少了10.46%、19.67%,盛铃期减少了9.07%、23.65%;亏缺灌溉N2较N1、N3处理棉花*Pn*在盛花期、盛铃期分别增加了20.07%和28.84%、8.48%和23.95%。

2.5 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花地上部分干物质积累的影响

从表6可以看出,亏缺灌溉处理下*V*m出现时间较常规灌溉平均提前了0.26~0.61 d,t_1平均提前了1~7 d,Δt延长了4~8 d。同一水分处理下各氮肥处理*V*m、t_1、t_2及Δt均表现为:N2>N1>N3;常规灌溉下*V*m与*GT*表现为:N1>N2>N3,N2、N3较N1处理棉花*V*m、*GT*分别降低了5.2%和8.98%,32.83%和78%;亏缺灌溉下各氮肥处理棉株*V*m与*GT*表现为:N2>N1>N3,且N2较N1、N3处理棉花干物质*V*m、*GT*分别增加了21.49%和31.25%,38.18%和90%。

2.6 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花地上部分干物质分配比例的影响

从图3和表7可以看出,棉花单株干物质积累随生育期的推进而增加,生殖器官干物质积累在初花期后逐渐增加,营养器官干物质积累先增后减。在相同氮肥处理下,亏缺灌溉的干物质积累量比常规灌溉平均降低了34.85%、12.21%。常规灌溉量下,不同氮肥处理的营养器官干物质比例呈现N3>N2>N1,生殖器官干物质比例呈现N1>N2>N3;在亏缺灌溉条件下,氮肥处理的棉花营养器官和生殖器官干物质积累比例为N2>N1>N3。在亏缺灌溉条件下,N2处理的营养生长向生殖生长的转移率为68.25%,常规灌溉条件下N1处理的转运率为65.47%。亏缺灌溉下N2处理生殖器官积累比例提高显著,比常规灌溉N1处理提高了2.78%。

2.7 氮肥运筹对花铃期水分亏缺下棉花产量、水分利用和氮肥偏生产力的影响

如表8所示,不同处理对棉花的收获株数与衣

表6 棉花干物质积累的Logistic模型及其特征值

Tab. 6 The logistic model and its characteristics on dry matter accumulation of cotton

灌溉量	氮肥处理	方程	t_0 /d	t_1 /d	t_2 /d	Δt /d	*V*m /(g·株⁻¹·d⁻¹)	*GT* /(g·株⁻¹)	R^2
W1	N1	y=103.4207/[1+e$^{(6.1056-0.070334t)}$]	87	68	105	37	1.82	89	0.9932**
	N2	y=138.5055/[1+e$^{(4.8617-0.048337t)}$]	101	70	123	53	1.73	67	0.9785*
	N3	y=75.8304/[1+e$^{(6.9961-0.091456t)}$]	76	63	92	29	1.67	50	0.9906**
W2	N1	y=102.9669/[1+e$^{(4.4691-0.047182t)}$]	93	63	108	45	1.21	55	0.9882*
	N2	y=117.0125/[1+e$^{(4.8805-0.050201t)}$]	97	71	123	52	1.47	76	0.9906**
	N3	y=63.7582/[1+e$^{(5.8160-0.076659t)}$]	76	56	89	33	1.12	40	0.9733*

注:t表示出苗后天数;y表示干物质积累量;*V*m表示干物质最大积累速率;t_0表示干物质最大积累速率出现的时间;t_1表示干物质进入快速积累期时间拐点;t_2表示干物质结束快速积累时间的拐点;Δt表示干物质快速积累持续时间;*GT*表示干物质快速积累期特征值。**表示P<0.01水平显著;*表示P<0.05水平显著。

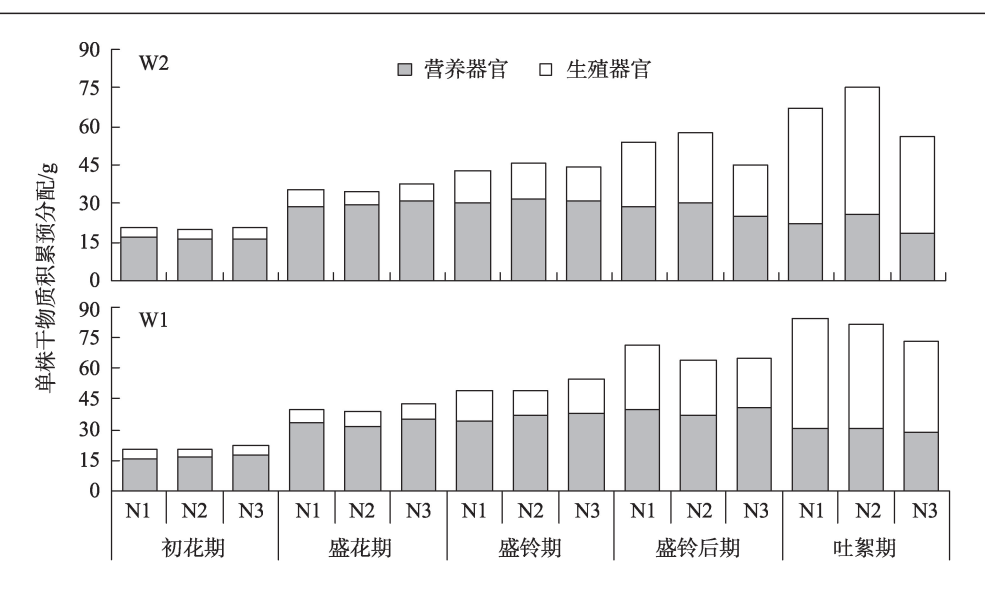


图3　不同生育时期各处理棉花营养器官与生殖器官干物质积累分配的动态变化

Fig. 3　Dynamic change of dry matter accumulation and distribution of vegetative organs and reproductive organs at different growth stages

表7　吐絮期棉花营养器官与生殖器官分配比例的比较

Tab. 7　Comparison of the distribution ratio of vegetative organs and reproductive organs in cotton

灌溉量	氮肥处理	单株干物质积累量/g	营养器官分配比例/%	生殖器官分配比例/%
W1	N1	84.43	34.53	65.47
	N2	82.01	36.87	63.13
	N3	73.12	39.02	60.98
W2	N1	67.68	34.28	65.72
	N2	74.83	31.75	68.25
	N3	60.16	30.18	66.50

表8　不同处理对棉花产量、水分利用和氮肥偏生产力的影响

Tab. 8　Effects of different treatments on cotton yield, water use and nitrogen fertilizer partial productivity

灌溉量	氮肥处理	单株结铃数	单铃重/g	衣分	籽棉产量/(kg·hm^{-2})	花铃期耗水量	水分利用效率/(kg·hm^{-2})	氮肥偏生产力/(kg·kg^{-1})
W1	N1	5.96a	6.24a	0.44a	6692.70a	284.10a	23.46bc	20.83a
	N2	5.56ab	5.83b	0.44a	5899.49b	282.10a	20.92c	18.25b
	N3	5.31bc	5.64bc	0.45a	5660.24b	279.14b	20.19c	17.79bc
W2	N1	5cd	5.23bc	0.44a	5052.98c	208.20d	25.43ab	16.55c
	N2	5.52ab	5.67ab	0.44a	5423.02a	210.84c	27.12b	17.87b
	N3	4.55d	5.08d	0.44a	4674.15c	204.87e	22.85bc	14.62d

分没有显著性影响，同常规灌溉相比，亏缺灌溉显著减少了单株铃数、单铃重和籽棉产量，其中单株铃数、单铃重平均降低了11.7%，45.6%，籽棉产量平均降低了17.3%，耗水量平均降低了35.49%，水分利用率平均增加了16.77%，氮肥偏生产力平均降低了15.97%。在常规灌溉下，N2，N3较N1处理棉花单株结铃数分别减少了7.19%、12.24%，单铃重分别减少了7.03%、10.63%，产量分别降低了13.44%、18.24%，耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力表现为N1>N2>N3；在亏缺灌溉条件下，与N1和N3处理相比，N2处理的棉花单株铃数、单铃重、籽棉产量分别增加了10.40%、16.02，8.41%、11.61%，7.32%、13.88%，耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力表现为：N2>N1>N3。在相同氮肥处理下，花铃期水分不足造成棉花减产，N2处理能够防止水分不足引起的大幅度减产。

3 讨 论

水分亏缺使作物的生长发育变得十分敏感[26-30]。在相同水分条件下，施用氮肥在一定程度上可以防止作物出现早衰现象[17]。陈玉梁等[28]对棉花水分亏缺研究发现，花铃期水分亏缺会使棉花果枝数、蕾铃数随灌水量呈正相关；闻磊等[31]研究表明，在同一氮肥水平下，水分亏缺会抑制作物的株高、叶面积指数等生长指标的增长。这与本研究亏缺灌溉较常规灌溉处理的株高、茎粗、主茎倒三叶宽及有效果枝数均降低，叶面积指数、净光合速率显著降低的研究结果一致。在干旱或水分胁迫下，施用氮肥可以促进生长。研究表明[32]，适量施氮可以改善棉花的生长过程，并在后期保持较高的叶面积指数和净光合速率。本试验在初花期后，氮肥后移使生育期滞后，N1、N3生育期提前，导致棉花早熟。从整个生长期来看，N3的生长进程明显提前，生长期缩短2~9 d；在亏缺灌溉条件下，N1和N3在初花后出现早衰，N3在自铃期后表现最为严重。在相同灌水量下，不同氮肥处理的叶面积指数和净光合速率随着氮肥的倒运先升高后降低，在盛铃期达到最大值。常规灌溉条件下，各氮肥处理表现为：N1>N2>N3，亏缺灌溉条件下为：N2>N1>N3。综上所述，在花铃期水分亏缺条件下，氮肥倒运有利于提高棉花株高、茎粗、主茎倒四叶宽、真叶数和有效果枝数；棉花后期叶面积指数显著增加，保持较高的净光合速率，有利于产量的形成。

作物干物质积累量对氮肥极为敏感，干物质的积累与分配是高产的基础；水分胁迫和营养不足是作物生长及产量的重要限制因子[33-34]。石洪亮等[7]研究表明，同一氮素水平下水分亏缺处理的作物干物质积累量、干物质最大积累速率以及生殖器官比例均低于常规灌溉处理。王钊[35]、苏继霞[8]等通过试验发现，适量氮肥后移能够使作物形成较多的干物质，达到增产增效的目的，这与本研究结果一致。本研究表明，亏缺灌溉较常规灌溉下快速生长时期缩短了0.6~3.7 d，使生殖器官干物质和营养器官的干物质积累量降低了12.21%、34.85%；常规灌溉下，*Vm*与*GT*及干物质积累量均表现为：N1>N2>N3；在亏缺灌溉条件下，随着氮肥的倒运，快速生长期的*Vm*与*GT*先增大后减小，N2处理最为协调，与N1和N3处理相比，棉花*Vm*分别提高了21.49%和31.25%；快速生长期，*GT*分别增加了38.18%和90%。谷晓博等[23]研究显示，通过合适的氮肥施用对水分胁迫存在一定的补偿效果，对产量表现出一定的补偿作用。本研究还表明，亏缺灌溉条件下，单株铃数、单铃重和籽棉产量显著降低，灌水量对衣分无显著差异；亏缺灌溉下N2较N1处理棉花单株结铃数增加了10.40%，单铃重降低了8.41%，籽棉产量增加了7.32%。在同一氮肥处理下，亏缺灌溉较常规灌溉减产，但是氮肥后移对亏缺灌溉的补偿效应明显。

氮肥后移在棉花[36]、冬小麦[37]、玉米[38]等作物均有研究，目前在棉花上集中在施氮量或不同生育时期配施比例，并且多在全生育期不同滴灌量下。本试验通过精准控水控肥，尝试通过花铃期氮肥运筹探索花铃期水分不足情况下提高产量的途径，并取得了一定的成果。但如何从棉花本身氮素代谢及运移等方面分析氮肥运筹对花铃期水分亏缺的作用，维持棉花在花铃期水分不足时的生长发育及产量，还需进一步探究。

4 结 论

（1）花铃期水分亏缺使棉花生育期提前，并降低了棉花株高、茎粗以及有效果枝数，此外花铃期水分亏缺显著降低了棉花叶面积指数及净光合速率，最终导致干物质积累量的降低、减少棉花单株结铃数及单铃重，最终造成减产20.47%。

（2）花铃期追施不同比例的氮肥有助于改善花铃期供水不足带来的负面影响，与正常灌溉相比，花铃期水分亏缺下，N2处理生育时期最为合理只相差2 d，N3和N1处理从初花期到吐絮期表现出不同程度的早衰，至吐絮期N3处理表现出严重的早衰；且N2处理的株高、茎粗、主茎倒四叶宽和真叶数均高于N1和N3处理，有效果枝数显著高于N1和N3；N2处理提高了花期叶面积指数和净光合速率，并在后期保持较高水平，自盛花期后始终表现为：N2>N1>N3。

（3）N2处理的棉花单株铃数、单铃重较N1、N3处理分别增加了10.40%、16.02和8.41%、11.61%；籽棉产量分别增加了7.32%、13.88%；耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力均表现为：N2 > N1>N3。因

此，在北疆棉花花铃期水分供应不足的情况下，氮肥后移(花期肥:铃期肥为2:4)对棉花产量的补偿作用最为明显，可以防止棉花大幅度减产。

参考文献(References):

[1] 丁红, 徐扬, 张冠初, 等. 不同生育期干旱与氮肥施用对花生氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(3): 695-703. [Ding Hong, Xu Yang, Zhang Guanchu, et al. Effects of drought at different growth stages and nitrogen application on nitrogen absorption and utilization in peanut[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(3): 695-703.]

[2] 张静鸽, 田福平, 苗海涛, 等. 水分胁迫及复水过程4种牧草形态及其生理特征表达[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 193-201. [Zhang Jingge, Tian Fuping, Miao Haitao, et al. Expressions of morphological and physiological features of 4 forage species under water stress and re-watering process[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 193-201.]

[3] 刘昭伟, 张盼, 王瑞, 等. 花铃期土壤持续干旱对棉铃对位叶气体交换参数和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3533-3539. [Liu Zhaowei, Zhang Pan, Wang Rui, et al. Effects of soil progressive drought during the flowering and bollTimes New Romanforming stage on gas exchange parameters and chlorophyll fluorescence characteristics of the subtending leaf to cotton boll [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3533-3539.]

[4] 马有绚, 张武, 张立祯. 近30年我国棉花需水特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1541-1552. [Ma Youxuan, Zhang Wu, Zhang Lizhen. Cotton water requirement character during recent 30 years in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1541-1552.]

[5] Dinh H T, Kaewpradit W, Jogloy S, et al. Nutrient uptake of peanut genotypes with different levels of drought tolerance under mid-season drought[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry, 2014, 38: 495-505.

[6] 何佩云, 张余, 周良, 等. 干旱胁迫及氮肥调控对苦荞植株形态、生理特性及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1): 128-134. [He Peiyun, Zhang Yu, Zhou Liang, et al. Effects of drought stress and nitrogen fertilizer regulation on morphology, physiological characteristics and yield of *Fagopyrum tataricum*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28 (1): 128-134.]

[7] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 氮肥对非充分灌溉下棉花产量及品质的补偿作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 134-145. [Shi Hongliang, Zhang Jusong, Yan Qingqing, et al. Compensation effects of nitrogen fertilizer on yield and quality of cottonunder insufficient irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 134-145.]

[8] 苏继霞, 王开勇, 费聪, 等. 氮肥运筹对干旱区滴灌甜菜氮素利用及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 72-75. [Su Jixia, Wang Kaiyong, Fei Cong, et al. Effects of nitrogen management on nitrogen use efficiency and yield of sugar beet under drip irrigation in arid regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 72-75.]

[9] 陈斐, 闫霜, 王鹤龄, 等. 不同水分胁迫下的春小麦叶片气体交换参数和水分利用效率研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 821-832. [Chen Fei, Yan Shuang, Wang Heling, et al. Study on gas exchange parameters and water use efficiency of spring wheat leaves under different levels of water stress[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 821-832.]

[10] 侯秀玲, 张炎, 王晓静, 等. 新疆超高密度棉田氮肥运筹对产量和氮肥利用的影响[J]. 棉花学报, 2006, 18(5): 273-278. [Hou Xiuling, Zhang Yan, Wang Xiaojing, et al. Effect of different nitrogen fertilization on yield and nitrogen using of super high-density cotton system[J]. Journal of Cotton, 2006, 18(5): 273-278.]

[11] Chen Y, Dong H. Mechanisms and regulation of senescence and maturity performance in cotton[J]. Field Crops Research, 2016, 189: 1-9.

[12] 刘素华, 彭延, 彭小峰, 等. 调亏灌溉与合理密植对旱区棉花生长发育及产量与品质的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(2): 184-188. [Liu Suhua, Peng Yan, Peng Xiaofeng, et al. Effects of regulated deficit irrigation and plant density on plant growth and yield and fiber quality of cotton in dry land area[J]. Cotton Science, 2016, 28(2): 184-188.]

[13] Zhan D, Zhang C, Yang Y, et al. Water deficit alters cotton canopy structure and increases photosynthesis in the mid-canopy layer[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(5): 1947-1957.

[14] 罗振, 辛承松, 李维江, 等. 部分根区灌溉与合理密植对旱区棉花产量和水分生产率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3137-3146. [Luo Zhen, Xin Chengsong, Li Weijiang, et al. Effects of partial root-zone irrigation and rational close planting on yield and water productivity of cotton in arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3137-3146.]

[15] 姚青青, 孙绘健, 罗静, 等. 减施氮肥运筹对棉花冠层光合有效辐射及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(8): 1404-1410. [Yao Qingqing, Sun Huijian, Luo Jing, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction regulation on cotton canopy photosynthetic effective radiation and yield[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(8): 1404-1410.]

[16] 陈求柱, 王志琴, 图尔汗, 等. 氮肥运筹对棉花干物质累积及产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(22): 5437-5442. [Chen Qiuzhu, Wang Zhiqin, Tu Erhan, et al. Effects of nitrogen management on dry matter accumulation and yield of cotton[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(22): 5437-5442.]

[17] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 等. 施氮量与花期水分胁迫对不同氮效率油菜产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(2): 220-226. [Zou Xiaoyun, Liu Baolin, Song Laiqiang, et al. Effects of nitrogen application and water stress at flowering stage on yield performance parameters and nitrogen use efficiency in rapeseed with different nitrogen use efficiency[J]. Journal of

North China Agriculture, 2015, 30(2): 220-226.]
[18] 孙一梅, 田青, 吕朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1569-1579. [Sun Yimei, Tian Qing, Lyu Peng, et al. Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf trait, and productivity in a semiarid sandy grassland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1569-1579.]
[19] 祁有玲, 张富仓, 李开峰. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2399-2405. [Qi Youling, Zhang Fucang, Li Kaifeng. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2399-2405.]
[20] 黄慧娴, 沈天花, 钟蕾, 等. 施氮对干旱条件下晚稻产量与生理的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 150-158. [Huang Huixian, Shen Tianhua, Zhong Lei, et al. Effects of nitrogen application on yield and physiology of late rice under drought condition[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 150-158.]
[21] 何佩云, 龙梦千, 冯洁, 等. 苦荞不同施氮量对干旱胁迫的响应[J]. 福建农业学报, 2021, 36(8): 892-898. [He Peiyun, Long Mengqian, Feng Jie, et al. Response of tartary buckwheat to nitrogen application under drought stress[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36(8): 892-898.]
[22] Chu Z A, Sfj B, Jie H A, et al. Trade-off of within-leaf nitrogen allocation between photosynthetic nitrogen-use efficiency and water deficit stress acclimation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 135: 41-50.
[23] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 不同施氮水平对返青期水分胁迫下冬油菜补偿效应的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 572-581. [Gu Xiaobo, Li Yuannong, Du Yadan, et al. Compensative impact of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) affected by water stress at re-greening stage under different nitrogen rate[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 572-581.]
[24] 解婷婷, 单立山, 苏培玺. 不同施氮量下干旱胁迫对棉花生长及种内关系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(5): 643-651. [Jie Tingting, Dan Lishan, Su Peixi. Effects of drought stress on cotton growth and intraspecific relationship under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 643-651.]
[25] 姚青青, 孙绘健, 马兴旺, 等. 减量追施氮肥运筹对棉花地上部干物质积累、分配及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8): 1398-1405. [Yao Qingqing, Sun Huijian, Ma Xingwang, et al. Effects of reduced-amount nitrogen application on cotton aboveground dry matter accumulation, distribution and yield [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(8): 1398-1405.]
[26] Fallahi H R, Kalantari R T, Aghhavani-Shajari M, et al. Effect of super absorbent polymer and irrigation deficit on water use efficiency, growth and yield of cotton[J]. Notulae Scientia Biologicae, 2015, 7(3): 338-344.
[27] Turner N C, Kramer P J. Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress[M]. USA : John Wiley and Sons, Inc., 1980.
[28] 陈玉梁, 石有太, 罗俊杰, 等. 干旱胁迫对彩色棉花农艺、品质性状和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2074-2082. [Chen Yuliang, Shi Youtai, Luo Junjie, et al. Effect of drought stress on agronomic traits, quality, and WUE in different colored upland cotton varieties (lines)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(11): 2074-2082.]
[29] 吕新, 张伟, 王登伟, 等. 棉花冠层对不同灌水量的反应[J]. 棉花学报, 2004, 16(1): 21-25. [Lyu Xin, Zhang Wei, Wang Dengwei, et al. The response of cotton canopy to different irrigation[J]. Journal of Cotton, 2004, 16(1): 21-25.]
[30] 张伟, 吕新. 棉花冠层对不同灌水量的反应及其产量形成研究[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 425-429. [Zhang Wei, Lyu Xin. Study on the effects of different irrigation volumes on cotton canopy[J]. Arid Zone Research, 2004, 21(4): 425-429.]
[31] 闻磊, 张富仓, 邹海洋, 等. 水分亏缺和施氮对春小麦生长和水氮利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(4): 478-486. [Wen Lei, Zhang Fucang, Zou Haiyang, et al. Effect of water deficit and nitrogen rate on the growth, water and nitrogen use of spring wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(4): 478-486.]
[32] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 非充分滴灌下施氮量对棉花生长特性、产量及水氮利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 129-136. [Shi Hongliang, Zhang Jusong, Yan Qingqing, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on growth, yield, water and nitrogen use efficiency of cotton under non-sufficient drip irrigation[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2017, 35(4): 129-136.]
[33] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 等. 亏缺灌溉对冬小麦生理生态指标的影响及应用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1086-1090. [Sun Hongyong, Zhang Xiying, Chen Suying, et al. Effects of deficit irrigation on physio-ecological indices of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1086-1090.]
[34] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 685-694. [Wang Xiaoying, He Mingrong, Liu Yonghuan, et al. nteractive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 685-694.]
[35] 王钊. 氮肥运筹对新疆大田滴灌棉花生长及氮素利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [Wang Zhao. Effects of Nitrogen Fertilizer to Fight the Growth and Nitrogen Utilization of Daeite Drip Irrigation in Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University & Technology, 2016.]
[36] 胡国智, 张炎, 李青军, 等. 氮肥运筹对棉花干物质积累、氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 397-403. [Hu Guozhi, Zhang Yan, Li Qingjun, et al. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter accumulation, N uptake and utilization and yield in cotton[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(2): 397-403.]

张杰, 王备战, 冯晓, 等. 氮肥调控对冬小麦干物质量、产量和氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(4): 516−520. [Zhang Jie, Wang Beizhan, Feng Xiao, et al. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter quantity, yield and N utilization in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(4): 516−520.]

[38] 王进斌, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(1): 60−69. [Wang Jinbin, Xie Junhong, Li Lingling, et al. Effects of nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of maize in arid areas of central Gansu, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(1): 60−69.]

Compensation effect of nitrogen fertilizer post-shift on water-deficient cotton yield at different stages

DAI Jianmin[1], HE Qingyu[2], XIE Ling[2], DOU Qiaoqiao[2], ZHANG Jusong[1]

(1. Agronomy College of Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Cotton Engineering Research Center of Ministry of Education, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: The flowering and boll stages are the most critical periods for the formation of cotton. To explore the compensation effect of nitrogen fertilizer backward shift on the yield of water-deficient cotton at the flowering and boll stages, Xinluzao No. 45 was used as the test material and a split-plot test design was adopted. The drip irrigation amount in two flowering and boll stages was determined as follows: a conventional irrigation amount of 2410 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (W1) was the control and the deficit irrigation amount was 1668 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (W2). N1 (flowering period fertilizer: boll period fertilizer 3:3), N2 (flowering period fertilizer: boll period fertilizer 2:4) and N3 (flowering period fertilizer: boll period fertilizer 4:2) was explored. Results showed that under the same nitrogen fertilizer conditions, the leaf area index (LAI) and net photosynthetic rate (*Pn*) of the water deficit were significantly lower than those of the normal irrigation treatment; was prolonged and the accumulation and proportion of dry matter in reproductive organs decreased significantly; the number and weight of bolls per plant decreased by an average of 11.7% and 45.6%, respectively, compared with normal irrigation; and the yield of seed cotton decreased by an average of 17.3%. The water consumption and partial productivity of nitrogen fertilizer decreased by 35.49% and 15.97% on average, respectively, and water use efficiency increased by an average of 16.77%. Compared with normal irrigation and under a water deficit condition at the flowering and boll stages, the LAI and *Pn* of cotton treated with nitrogen fertilizer (N2) increased compared with that of N1 and N3 and the expression was N2 > N1 > N3. The dry matter accumulation, Δt, and *V*m performed best under fertilization, *GT* was the most coordinated, and the transfer rate from vegetative growth to reproductive growth of cotton was the highest at 68.25%. The number of bolls per plant and weight of single bolls increased by 10.40%, 16.02%, 8.41%, and 11.61%, respectively, and the yield of seed cotton increased by 7.32% and 13.88%, respectively. Water consumption, water use efficiency, and partial nitrogen fertilizer productivity were as follows: N2 > N1 > N3. In summary, a backward shift in nitrogen fertilizer can increase the LAI and *Pn* of cotton in the flowering stage, slow down the decline of LAI and *Pn* in the late boll stage, increase dry matter accumulation in the aerial part and increase the proportion of reproductive organs, and regulate the yield and its components to reduce the impact of water stress.

Keywords: cotton; nitrogen fertilizer back; flowering and boll stage; water deficit; nitrogen fertilizer management